شبیه‌سازی عددی میکسر موتور با سوخت CNG و بهینه‌سازی آن*

(یادداشت پژوهشی)

بهزاد قدیری دهکردی[۱] پویان ادیبی[۲]

چکیده *در این مقاله، شبیه‌سازی عددی جریان مخلوط هوا و گاز در میکسر موتور دوسوخته کاربراتوری توسط نرم‌افزار فلوئنت در طراحی‌های مختلف و با استفاده از شاخص پارامتر λ انجام شده‌است. به منظور ایجاد λ استوکیومتریک برای به‌سوزی سوخت و کاهش میزان آلاینده‌ها تغییراتی در هندسه‌ی میکسر اولیه‌ی موتور دوسوخته پراید کاربراتوری- به عنوان نمونه- ایجاد شده‌است. تغییرات در قطر گلویی، قطر سوراخ‌های ورودی گاز و تعداد آن‌ها در سرعت‌های مختلف (دورهای مختلف موتور) درنظرگرفته شده‌اند. پس از شبیه‌سازی میکسر با طراحی‌های مختلف و یافتن نحوه‌ی تأثیر هرکدام از پارامترهای ذکر شده بر میزان λ، آن‌هایی را که از نظر شبیه‌سازی مناسب تشخیص داده شده‌اند. برای تأیید نتایج تئوری، ساخته و مورد تست قدرت و سنجش آلودگی قرار گرفته‌اند. نتایج تست، همگی مؤید نتایج تئوری بوده و در بهینه‌ترین حالت، طراحی مناسبی با قابلیت‌های عملکردی نزدیک به کارکرد بنزینی و کاهش درصد افت قدرت به میزان ۱۰٪ و نیز کاهش میزان آلاینده‌های CO (۱۰۰٪) و HC (۷۹٪) در خروجی حالت گازسوز نسبت به حالت بنزین‌سوز می‌باشند.*

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی، میکسر، CNG، بهینه‌سازی.

Optimization and Numerical simulation of an Engine Mixer for CNG fuel

P. Adibi B. Ghadiri Dehkordi

Abstract *In this paper, Fluent software is used to study the flow behavior of methane and air in a CNG-air mixer. Analyses were carried out on various designs to investigate the effect of engine speed on the λ. The design was optimized for throat size, number and size of the holes at the throat circumference. The prototypes were manufactured based on optimized dimensions that were obtained from CFD analyses. The experiments have been done on the prototypes in order to verify the results obtained from CFD analyses. The results show that the performance of the optimized design was good and the decrease of engine power was about 10% and the pollutants such as CO and HC in the gas mode in comparison with the gasoline mode were decreased* 100% and 79% respectively.

Key Words Simulation, Optimization, CNG, Mixer.

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۷/۳/۲۱ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/۲/۱۹ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

(۲) نویسنده مسؤول: کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

با آغاز پروژه‌ی عظیم گازسوز کردن خودروها به صورت فراگیر در سال‌های اخیر به منظور کاهش مصرف فزاینده‌ی بنزین در کشور و جایگزینی آن با سوخت CNG (Compressed Natural Gas) (به دلیل پاک بودن آن و فراوانی ذخائر گاز طبیعی در کشور)، بحث دوسوخته کردن خودروهای موجود بنزینی به موازات فرآیند تولید کارخانه‌ای موتورهای دوسوخته و پایه گازسوز (OEM (Original Equipment Manufacturer))، جایگاهی ویژه یافته- است.

تعداد قابل توجهی از خودروهای موجود در ناوگان حمل و نقل کشور تا سال ۸۵ (زمان آغاز این تحقیق) از نوع کاربراتوری بوده‌اند و همان‌طور که می‌دانیم این خودروها جوابگوی آخرین استانداردهای سخت‌گیرانه‌ی آلایندگی نمی‌باشند، اما فراوانی این نوع خودروها در کشور و تقاضای مالکان این دسته از خودروها جهت گازسوز کردن خودروهای خود در کارگاه‌های تبدیل، انگیزه‌ای شد تا محققین این پروژه، به منظور بهینه سازی و بهبود در میزان آلاینده‌ها و کاهش مقدار افت توان ناشی از استفاده از سوخت گاز به جای بنزین، بدترین نوع موتور (کاربراتوری) و فراوان ترین آن‌ها (یعنی موتور پراید) مورد مطالعه و بررسی دقیق قرار دهند. نتایج تئوری و عملی به‌دست آمده، نشانگر این مدعا و ارزشمندی این تحقیق می‌باشند.

تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با سوخت‌های جایگزین بنزین در موتورهای احتراق داخلی انجام شده‌است. مطالعات عمده در رابطه با قدرت موتور در حالت استفاده از آن‌ها در مقایسه با بنزین؛ گازوئیل و نیز اثرات زیست محیطی این سوخت‌ها صورت گرفته است.

دولگر ز(Dulger Z) [۱] در رساله‌ی دکتری خود با عنوان مدل‌سازی عددی حرارت آزاد شده و انتشار شعله‌ی سوخت متان با هیدروژن افزوده شده به آن در موتورهای احتراق داخلی تحقیق کرده است. او ترکیبی از ۸۰٪ متان و ۲۰٪ هیدروژن را مورد مطالعه قرار داده است.

همچنین تحقیقات مختلفی درباره‌ی کیت‌های تبدیل و قطعه‌ی میکسر انجام شده‌است. یوسف، ت(.Yusaf T) و زمری، م (.Zamri M) [۲] در تحقیق خود در زمینه‌ی توسعه‌ی مدل سه بعدی CFD جهت مشاهده‌ی تأثیر کیفیت اختلاط بر عملکرد موتور دیزلی گازسوز به بررسی رفتار جریان گاز و هوا در یک میکسر پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داده‌است که یک میکسر هشت سوراخه، عملکرد بهتری در مقایسه با میکسر چهار سوراخه خواهد داشت. نتایج تست میکسر ساخته شده بر روی موتور، کاهش ترکیبات آلاینده‌های خروجی از اتومبیل نظیر NO_x، CO و CO_2 نسبت به سوخت دیزل نشان می‌دهد. به‌کارگیری سیستم دوگانه‌سوز (با میکسرنوع ونتوری ثابت) غلظت NO_x، CO و CO_2 را به طور متوسط به‌ترتیب به‌میزان ۵٤٪، ۵۹٪ و ۳۱٪ کاهش می‌دهد. قدرت متوسط خروجی موتور دوگانه سوز ۱۰٪ بیشتر از موتور دیزلی در دورهای مورد آزمایش بوده‌است.

تلال ف یوسف و همکاران [۳] نیز با به‌کارگیری نرم‌افزار+CFD-ACE و شبیه‌سازی میکسر موتور دوگانه‌سوز گازوئیل- متان، طراحی مناسبی برای یک نمونه موتور دیزل تجاری به‌دست آورده‌اند.

خرم‌فر و همکاران [٤] در تحقیق خود تحت و عنوان راه‌کاری برای بهینه سازی افت توان خودروهای دوگانه‌سوز ناشی از استفاده‌ی میکسر در حالت بنزین‌سوز استفاده از سیستم جبران کننده‌ی هوای ورودی به موتور، برای جبران سطح مقطع پوشیده شده را توسط میکسر پیشنهاد نموده‌اند.

برای به‌دست آوردن میدان حل یک پدیده‌ی نسبتاً پیچیده‌ی صنعتی، بایستی یک سری ساده‌سازی‌ها اعمال شود تا حل جریان ممکن گردد. بنابراین با شبیه‌سازی، رسیدن به آنچه که واقعاً در عمل اتفاق می‌افتد، ممکن نیست، اما با ایجاد و ارائه‌ی مدل جهت حل مسائل فیزیکی با روش‌های CFD (Computational Fluid Dynamic) می‌توان شرایط واقعی را شبیه‌سازی کرد

که نتایج آن قابل اعتماد خواهندبود. در این مقاله ابتدا به شبیه‌سازی و حل عددی میکسر موجود پرداخته شده‌است؛ سپس با تغییر پارامترهای هندسی میکسر، شبیه‌سازی انجام می‌شود تا طراحی بهینه و مطلوب به دست آید.

مطالعه و بررسی پارامترهای مؤثر بر طراحی

به منظور یافتن پارامترهای مؤثر در طراحی میکسر، تمرکز بر پارامترهای هندسی(Geometrical Parameters) نظیرطول، قطرگلویی(Throttle Diameter) و قطر سوراخ‌های ورودی سوخت و تعداد آن‌ها می‌باشد. از آن‌جا که بازده سوخت، مستقیماً به درجه‌ی همگنی مخلوط گاز و هوا بستگی دارد، باید از همگنی مخلوط قبل از ورود به محفظه‌ی احتراق، مطمئن شد.

شبیه‌سازی میکسر

پس از اندازه‌گیری میکسر و یافتن مختصات نقاط مهم آن، مدل اولیه در پیش‌پردازنده‌ی گمبیت(Gambit) ترسیم می‌شود. بایستی که شبکه‌ی حل جواب‌های همگرا و با دقت مطلوب داده و جوابها مستقل از اندازه‌ی گریدها باشند. استقلال میدان حل از اندازه گریدها با چندبار حل کردن مسأله در شبکه‌های مختلف که با ریز کردن شبکه‌ی اولیه حاصل شده‌اند، به‌دست می‌آید(Grid Independency). در واقع زمانی‌که میدان حل با ریزکردن شبکه تغییری نکند، اندازه‌ی گریدها قابل قبول است. در نهایت شبکه بندی حجم با عناصر هگز(Hex) و نوع مپ(Map) و فاصله‌ی بین عناصر(Interval Size) برابر ۰/۲۵ میلی‌متر جهت حل جریان شبیه‌سازی شده به حل کننده‌ی فلوئنت صادر می‌شود. پس از خواندن شبکه در فلوئنت و تعریف شرایط مرزی و کارکردی برای آن – که در ادامه توضیح داده خواهند شد- حل میدان جریان در میکسر آغاز می‌شود.

فرضیات

فرض می‌شود که هوا شامل عناصر ذیل باشد (جدول ۱).

جدول ۱ درصد جرمی عناصر هوا

درصد جرمی	عنصر
۲۲/۵	O_2
۷۵/٤	N_2
۰/٦	H_2O
۱/۵	CO_2

گاز متان در مخزن ذخیره با فشار ۲۰۰bar نگهداری می‌شود. گاز باید برای استفاده به عنوان سوخت با هوا ترکیب شده و وارد موتور شود. ابتدا در قطعه‌ای به نام رگولاتور فشار گاز به حدود ۱bar کاهش یافته و سپس وارد میکسر می‌شود. بنابراین فشار ورودی آن ثابت و برابر فشار استاندارد اتمسفر (1bar=101325Pa) در نظر گرفته شده‌است.

سرعت ورودی هوا و میزان سوخت مکیده شده به میکسر، تابع موقعیت دریچه‌ی گاز است که در دورهای کارکرد معمول موتور (1000rpm، 2000 rpm، 2800 rpm و3000 rpm) شبیه سازی شده‌اند. پس از حل، داده‌های خروجی مختلف، نظیر دبی‌های جرمی گاز و هوا قابل استخراج می‌باشند.

خواص جریان

۱- جریان غیر واکنشی: در این پروژه، فرض می‌شود که مخلوط CNG و هوا هیچ‌گونه برهم‌کنشی با هم ندارند و فقط این دو سیال در میکسر با یکدیگر مخلوط می‌شوند.

۲- جریان تراکم‌پذیر: جریان مدل‌شده دراین پروژه یک جریان تراکم‌پذیر است؛ بنابراین چگالی سیال ثابت نیست. از آن‌جایی‌که دراین پروژه معادله‌ی تصحیح فشار و چگالی مورد نیاز برای هر سیال می‌تواند بر مبنای جزء فشار یا جرم مشخصه‌ها محاسبه؛ زیرا که این مشخصه‌ها به عنوان مقادیر ورودی شرایط اولیه وارد می‌شوند.

۳- جریان پایا (Steady): در این تحقیق فرض می‌شود که جریان هوا و گاز در میکسر دایمی بوده و به زمان وابسته نمی‌باشد.

٤- تغییرات دما: به‌دلیل تراکم‌پذیر بودن جریان، خواص سیال، مانند: چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و... وابسته به دما بوده و متغیر می‌باشند.

معادلات حاکم

روش دینامیک سیالات محاسباتی(CFD) در فلوئنت از معادلات دیفرانسیل پاره‌ای (PDE) (Partial Differential Equation) متغیرهای جریان برای محاسبه و شبیه‌سازی عددی انواع تحلیل‌های مرتبط با جریان سیال استفاده می‌کند. از جمله متغیرهای جریان که به طور مشترک در تحلیل‌ها به کار می‌روند، عبارتند از: جرم، مومنتوم، انرژی، تراکم گونه‌ها (Species Concentration)، مقادیر توربولانسی و اجزاء مخلوط (Mixture Fractions). بنابراین معادلات حاکم که در این تحلیل استفاده می‌شوند عبارتند از: معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و معادلات توربولانس.

معادله‌ی بقای جرم. معادله‌ی پیوستگی یا معادله‌ی بقای جرم برای هر جریان سیال به فرم زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j)=\dot{m} \qquad (١)$$

که:

ρ: چگالی سیال،

u_j: مؤلفه‌ی کارتزین j ام سرعت لحظه‌ای،

$\dot{m}$: نرخ تولید جرم ماده در سیستم،

معادله‌ی مذکور، برای سیالات تراکم پذیر و تراکم‌ناپذیر معتبر است. علاوه بر نرخ جرم تولیدی در سیستم، $\dot{m}$ می‌تواند بعنوان جرم اضافه شده به فاز پیوسته از فاز دومی نظیر قطرات بخار مایع و هر منبع دیگر مشخص شده توسط کاربر، تعریف شود.

معادله‌ی بقای مومنتوم. بقای مومنتوم در جهت i در مختصات مرجع اینرسی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i \qquad (٢)$$

که:

ρ: چگالی سیال،

u_i & u_j: مؤلفه‌های کارتزین i ام و j ام سرعت لحظه‌ای،

p: فشار استاتیک،

τ_{ij}: تانسور تنش،

ρg_i: نیروی جسمی گرانشی،

F_i: نیروی جسمی خارجی از فاز دیگر در جهت i

تانسور تنش در معادله‌ی (٢) برابر است با:

$$\tau_{ij}=\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij} \qquad (٣)$$

μ: ویسکوزیته دینامیکی سیال،

δ_{ij}: دلتای کرانکر،

توجه کنید که ترم دوم در سمت راست معادله‌ی(٣) تأثیر اتساع حجمی را نشان می‌دهد. با جانشانی معادله‌ی (٣) در معادله (٢) معادله ناویراستوکس حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij}\right\}+\rho g_i+F_i \qquad (٤)$$

معادله‌ی بقای انرژی. معادله‌ی دیفرانسیل پاره‌ای بقای انرژی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[u_i(\rho e+p)\right]=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i}-\sum_{j'} h_{j'}J_{j'}+u_j(\tau_{ij})_{eff}\right]+S_h \qquad (٥)$$

که:

$$k_{eff}=k+k_t$$

k_t = هدایت حرارتی توربولانس،

k_{eff}: هدایت مؤثر،

$J_{j'}$: شار دیفیوژن مشخصه 'j،

S_h: منابع حرارتی حجمی تولیدی مثل حرارت واکنش شیمیایی،

h: انتالپی محسوس،

e: انرژی کل مخصوص؛

$h_{j'} = \int_{T_{ref}}^{T} c_{p,j'} dT$ با T_{ref} =۲۹۸/۱۵K

سه جمله‌ی اول سمت راست معادله‌ی (۵)، نشان دهنده‌ی انتقال انرژی به‌علت هدایت، دیفیوژن مشخصه‌ها و متناسب آن، توزیع ویسکوزیته می‌باشند.

همچنین از معادلات (٦) و (۷)، انرژی کل محسوس و انتالپی محسوس به‌صورت ذیل تعریف می‌شوند:

$$e = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \qquad (٦)$$

انتالپی محسوس برای گاز ایده‌ال:

$$h = \sum_{j'} m_{j'} h_{j'} \qquad (۷)$$

معادله‌ی توربولانس. جریان مغشوش با میدان سرعت نوسانی توصیف می‌شود. نوسانات، باعث اغتشاش در کمیت‌های مومنتوم، انرژی و غلظت مشخصه‌ها می‌شوند. در فلوئنت، جریان مغشوش به روش‌های مختلفی بسته به نوع مسأله می‌تواند مدل شود.

در این تحقیق از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده‌است. به طور کلی، این مدل از دو معادله‌ی دیفرانسیل پاره‌ای انتقالی، استفاده می‌کند، یعنی انرژی جنبشی توربولانس انتقالی(k) و نرخ توزیع آن(ε). فرض می‌شود که سیستم جریان، کاملاً مغشوش بوده و تأثیر ویسکوزیته‌ی مولکولی ناچیز باشد. معادلات انتقال برای انرژی جنبشی انتقالی(k) و نرخ توزیع آن(ε) در ذیل تعریف شده‌اند:

$$\rho\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t})\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \qquad (۸)$$

$$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + G_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۹)$$

که:

G_k: تولید انرژی جنبشی توربولانس وابسته به گرادیان‌های سرعت متوسط برابر است با:

$$-\rho\overline{u'_i u'_j}\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \qquad (۱۰)$$

G_b: نرخ انرژی جنبشی مغشوش به علت شناوری برابر است با:

$$\beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial T}{\partial x_i} \qquad (۱۱)$$

برای گاز ایده‌ال داریم:

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p$$

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t}\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \qquad (۱۲)$$

Pr_t: عدد پرانتل مغشوش (برای انرژی برابر ۰/۸۵ درنظر گرفته می‌شود).

Y_M: انبساط نوسانی در توربولانس تراکم پذیر به نرخ اتلاف کلی است و برابر است با:

$$\rho\varepsilon^2 M_t^2 \qquad (۱۳)$$

$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$(عدد ماخ مغشوش)،

a: سرعت صوت،

$C_{1\varepsilon}$ & $C_{2\varepsilon}$: ثابت‌های می‌دهد (طبق تعریف به‌ترتیب ۱/٤٤ و ۱/۹۲)

$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{v}{u}\right|$

v: مؤلفه‌ی عمودی سرعت سیال،

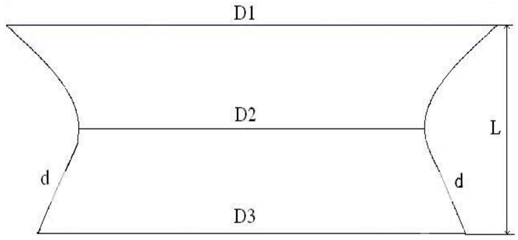
u: مؤلفه‌ی افقی سرعت سیال،

σ_k & σ_ε: ثابت‌های بی بعد k و ε و طبق تعریف به‌ترتیب ۱/۳ و ۱/۰.

V: حجم سلول

روند شبیه‌سازی

مشخصات هندسی میکسر مورد استفاده. مقطع میکسر مورد بحث به همراه اندازه‌های مهم اولیه در طراحی آن در شکل(۱) و جدول(۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱ مقطع میکسر

جدول ۲ اندازه‌های میکسر اولیه

قطر ورودی هوا(D_1)	۴۳/۶mm
قطر گلویی میکسر(D_2)	۳۱mm
قطر ورودی گاز(d)	۲/۵mm
قطرخروجی میکسر(D_3)	۳۸mm
طول میکسر(L)	۱۵/۲mm
تعداد سوراخ‌های ورودی گاز(n)	۲۰

همان‌طور که از شکل (۱) قابل مشاهده است، میکسر، دارای ۵ اندازه‌ی مهم هندسی می‌باشد که قابل تغییر است؛ البته دو اندازه‌ی D_1 و D_3 به‌دلیل این‌که وابسته به اندازه‌ی فیلتر هوای ورودی در بالا و کاربراتور در پایین می‌باشد، ثابت فرض می‌شود.

کارکرد مطلوب میکسر زمانی‌است که نسبت اختلاط سوخت و هوا مناسب باشد(حدود۱تا۱/۵). این نسبت به نسبت استوکیومتری معروف بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{(A/F)_a}{(A/F)_s} \qquad (۱٤)$$

کسر فوق، نسبت هوا به سوخت در شرایط واقعی سیستم را به حالت ایده‌آل یا استوکیومتری نشان می‌دهد. این نسبت، بیان کننده‌ی عملکرد موتور و انحراف آن از حالت استوکیومتری می‌باشد.

شرایط مرزی. دبی هوای ورودی مورد نیاز موتور(Q_a) وابسته به دور موتور(N)، حجم جابه‌جا موتور (V_d) (Displacement) و نسبت تحویل (D_r)(Delivery Ratio) می‌باشد و به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد [۵]:

$$Q_a = D_r \times N \times V_d \quad \left(m^3/s\right) \qquad (۱٥)$$

نسبت تحویل نشان‌دهنده‌ی میزان هوایی است که به درون موتور کشیده شده و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{نسبت تحویل} = \frac{\text{جرم هوای ورودی به موتور در هر سیکل}}{\text{چگالی هوا} \times \text{حجم جابجا شده}}$$

نسبت تحویل در موتورهای مختلف، متفاوت است و بین ۰/۸۵ در موتورهای تنفس طبیعی تا ۱/۵ در موتورهای سوپرشارژر متغیر است.

در میکسر مورد بحث با توجه به مشخصات هندسی اشاره شده و نیز در نظر گرفتن حداقلD_r، هوای ورودی به موتور در سرعت N عبارت است از:

– حجم جابه‌جایی در موتور پراید، برابر 1323cc است و:

$$Q_a = 0.85 \times \frac{N}{60} \times 2\pi \times 1323 \times 10^{-6} = 1.18 \times 10^{-4} N$$

با توجه به قطر ورودی هوا، سرعت آن عبارتست از:

$$D_1 = 43.6mm = 43.6 \times 10^{-3} m \Rightarrow V_a = \frac{Q_a}{\pi/4 \, D_1^2} = 0.079N$$

بنابراین سرعت ورودی هوا در دورهای مختلف به قرار زیر است:

N(rpm)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۸۰۰	۳۰۰۰
$V_a(m/s)$	۷۹	۱۵۸	۲۲۱	۲۳۷

شرط مرزی ورود سوخت، فشار استاتیک ثابت می‌باشد. با فرض ثابت ماندن فشار خروجی از رگولاتور، فشار استاتیک ورودی به میکسر، برابر 1bar(101325Pa) درنظر گرفته می‌شود.

نمودار داده‌های حاصل از شبیه‌سازی

حروف و علایم اختصاری به‌کار رفته به شرح ذیل می‌باشند:

L: طول میکسر،

D_2: قطر گلویی،

s: فاصله‌ی بین سوراخ‌ها،

d: قطر سوراخ ورودی گاز،

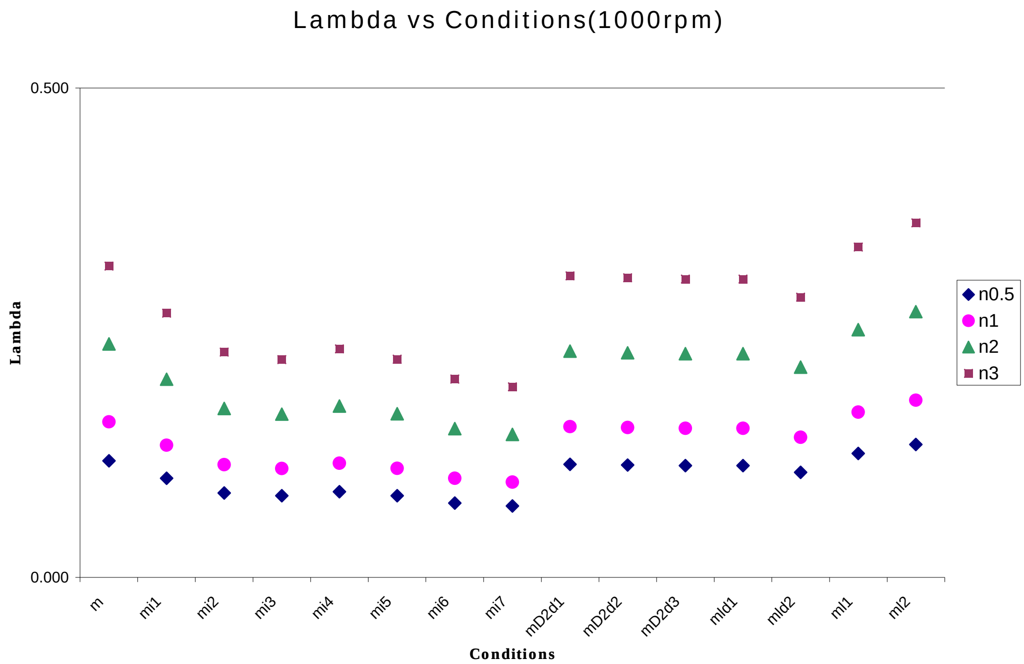
n: تعداد سوراخ‌های ورودی.

جهت تنوع در طراحی، فاصله‌ی بین سوراخ‌های ورودی گاز، ضریبی از قطر آن‌ها درنظر گرفته شده است و با نام‌های n0/5، n1، n2 و n3 که به‌ترتیب بیانگر مقدار فاصله $d/2$، d، 2d و 3d می‌باشند، مشخص شده‌اند. تعداد سوراخ‌ها، بسته به اندازه‌ی قطر و فاصله‌ی بین دو سوراخ متوالی و میزان فضای موجود بعد از ونتوری به‌دست می‌آید. سوراخ‌های ورودی گاز به‌صورت متقارن پیرامون میکسر قرار می‌گیرند.

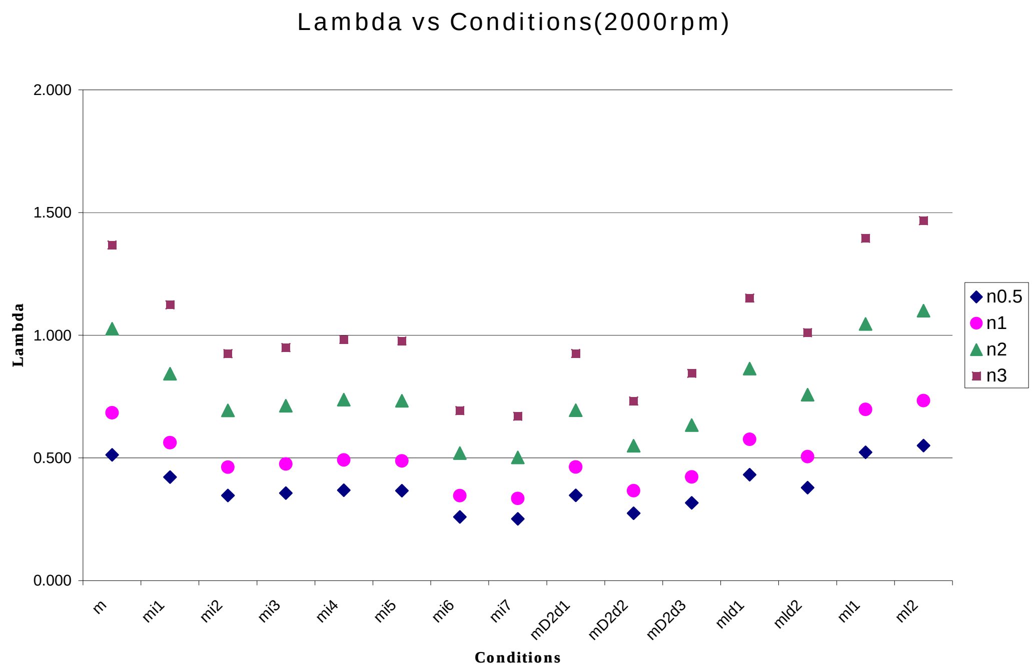
جمع‌بندی نتایج

پس از شبیه‌سازی و حل جریان در میکسر موجود، این‌گونه نتیجه‌گیری می‌شود که میزان سوخت ورودی به ازای هوای ورودی در کارکرد نرمال و معمول موتور که در شرایط شبیه‌سازی اعمال شد، کافی نمی‌باشد و بایستی به نحوی مقدار آن را افزایش داد. راه‌های افزایش گاز ورودی، شامل افزایش قطر و تعداد سوراخ‌های ورودی گاز و کاهش قطر ونتوری میکسر، جهت مکش بیشتر گاز به‌دلیل افزایش افت فشار ناشی از آن می‌باشد. تمامی عوامل فوق، شبیه‌سازی شده‌اند.

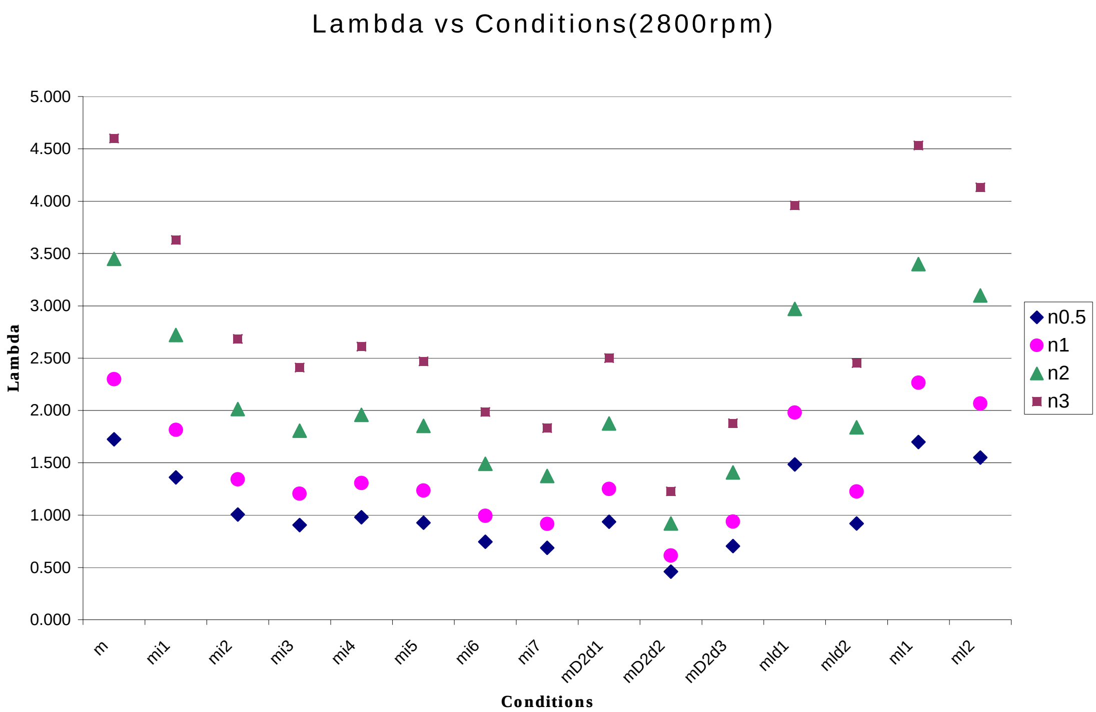
در شکل‌های(۲ تا ۵) نمودار مقادیر λ برحسب شرایط حاصل از ۲٤۰ حالت مختلف شبیه‌سازی، آورده شده‌اند.



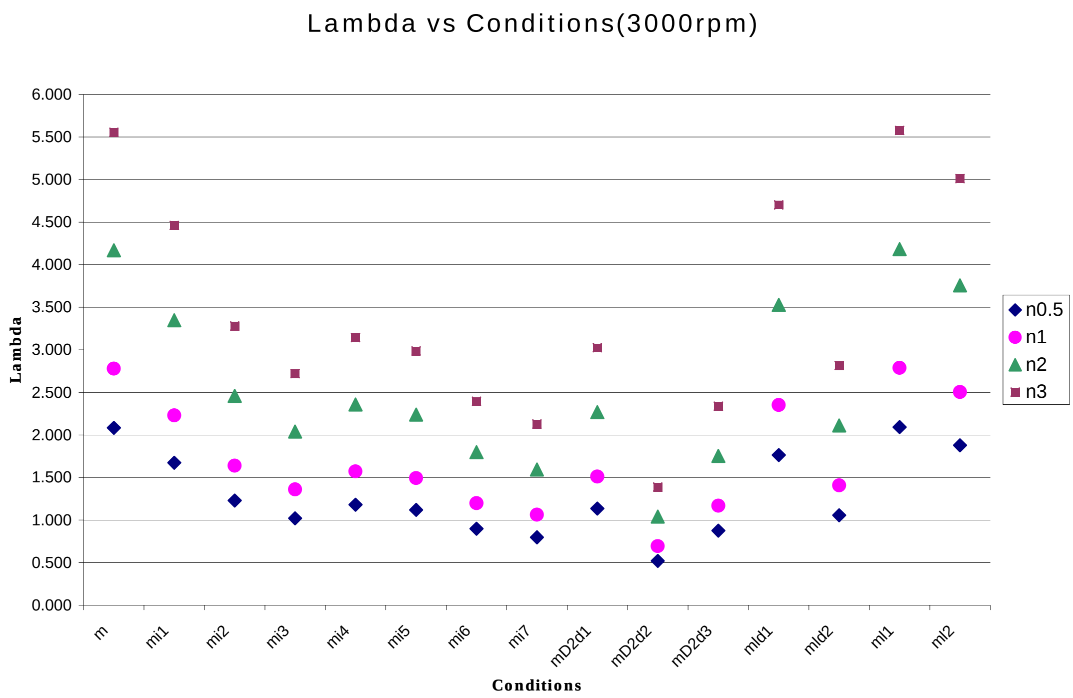
شکل ۲ نمودار λ برحسب حالت‌های مختلف شبیه‌سازی در دور 1000rpm



شکل ۳ نمودار λ برحسب حالت‌های مختلف شبیه‌سازی در دور 2000rpm



شکل ٤ نمودار λ برحسب حالت‌های مختلف شبیه‌سازی در دور 2800rpm



شکل ۵ نمودار λ برحسب حالت‌های مختلف شبیه‌سازی در دور 3000rpm

از نمودارهای فوق، نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱. قطر سوراخ ورودی گاز و تعداد آن‌ها تأثیر مهم و اصلی را بر نسبت استوکیومتری می‌گذارند و عمده‌ی تغییرات، حول این دو پارامترمی‌باشند. اندازه‌های d و n با λ نسبت عکس دارند.

۲. قطر گلویی میکسر نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار λ دارد. مقدار D_2 با λ نسبت مستقیم دارد.

۳. هرچه طول میکسر بیشتر باشد، همگنی مخلوط سوخت و هوا بهتر می‌شود؛ زیرا زمان اختلاط افزایش می‌یابد؛ اما تغییر زیاد در طول، می‌تواند باعث ایجاد اشکال در جانمایی میکسر در مدار سوخت‌رسانی گردد. بنابراین برای جلوگیری از ایجاد مشکلات احتمالی، طول ثابت درنظر گرفته شده‌است.

ساخت نمونه‌های میکسر

جهت تأیید نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالات مختلف طراحی میکسر، لازم است که چندین نمونه میکسری که طبق داده‌های تئوری مناسب هستند به منظور آزمایش ساخته شوند. همانگونه که پیش از این نیز ذکر شد، میکسری مناسب است که نسبت هوا به سوخت استوکیومتری را به لحاظ تئوری فراهم کند.

از آن‌جایی‌که مخلوط هوا و گاز جهت احتراق در موتور، در میکسر آماده می‌شود، لذا بایستی از اختلاط مناسب هوا و گاز پیش از ورود به موتور مطمئن شد که این مهم با سنجش پارامتر λ ارزیابی می‌شود. با توجه به این‌که تحقیق حاضر درخصوص قطعه میکسر از سیستم سوخت رسانی خودرو می‌باشد، لذا جهت بررسی میکسر و عدم بررسی سیستم سوخت رسانی با جزئیات کامل، تأثیر کلیه‌ی کنترلرهای نسبت سوخت و هوا در مدار سوخت رسانی، در میکسر سنجیده شده-

است.

هم‌چنین به‌دلیل این‌که هدف این تحقیق، کاهش کیفی و کمی آلاینده‌ها و نیز کاهش در افت قدرت موتور نسبت به حالت اولیه بوده‌است؛ لذا فرض فوق شرایط تحلیل و بهینه سازی میکسر را دشوارتر نموده-است.

معیار انتخاب میکسر برای ساخت و تست. معیار انتخاب میکسر مناسب و بهینه مقدار λ،عملکرد آن در دورهای معمول کارکرد موتور، یعنی دورهای 2800rpm و 3000rpm می‌باشد. البته دورهای 1000rpm و 2000rpm که بترتیب نمایانگر دورهای کارکرد موتور در حالت بی‌بار و گذار به دور بالا می‌باشند؛ جهت بررسی روند بهبود نسبت هوا به سوخت نسبی مورد تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند.

طراحی‌های mi7 و mi6 در حالت n10 و دورهای 2800rpm و 3000rpm ، حالت n2 و دور 2800 rpm ، حالت n0.5 دور 3000rpm و با $\lambda \cong ۱$ نشان‌دهنده‌ی طراحی مناسب می‌باشند. چون حالت‌های فوق، تفاوت اندکی در اندازه‌ی قطر سوراخ ورودی گاز دارند، میکسری تحت عنوان حالت اول در جدول (۳) با درنظر گرفتن ملاحظات ساخت و اندازه‌های دو طراحی mi7 و mi6، ساخته شده‌است.

با ریزتر شدن قطر سوراخ ورودی گاز و در پی آن، افزایش تعداد آن‌ها، سوخت با سرعت بالاتری وارد میکسر شده و به دلیل افزایش اغتشاش میزان اختلاط بهبود خواهد یافت؛ البته کاهش قطر سوراخ ورودی گاز به لحاظ عملی، چه در مرحله‌ی ساخت و چه در مرحله‌ی تست، با مشکلاتی روبه‌رو خواهد شد. بنابراین برای d بایستی حداقلی درنظر گرفت که این موضوع با ساخت میکسر حالت دوم و تست آن مشخص می‌شود. به لحاظ ساخت قطعه‌ی میکسر، حداقل قطر مته به‌کار گرفته، 1mm می‌باشد که این اندازه قابلیت ایجاد سوراخی به‌اندازه‌ی ۱/۲ میلی‌متر خواهد داشت.

طراحی md2 نیز با $\lambda \cong ۱$ در محدوده‌ی سرعت مورد بحث، مناسب می‌باشد. البته این طراحی به‌دلیل ملاحظات ساخت با تغییری در تعداد سوراخ‌ها (۳٦ به ۳۰) و اندازه‌ی d (۱/۵ به ۱/۷) مواجه می‌شود. این طراحی به نام حالت سوم در جدول ۳ نشان داده شده-است

حالت mD2d2 با $\lambda \cong ۱$ در دور 3000rpm در بین حالت‌هایی که با کاهش قطر ونتوری به طراحی بهینه نزدیک شده‌اند؛ بهترین حالت می‌باشد. این طراحی نیز با نام حالت چهارم در جدول (۳) نشان داده شده‌است. حال با توجه به موارد فوق و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و درنظر گرفتن ملاحظات ساخت، میکسرهای ذیل ساخته شده و مورد تست قرار گرفته خواهند شد؛ میکسرهای ساخته شده‌ی فلزی که جنس آن‌ها از آلومینیوم می‌باشد. (جدول۳)

جدول ۳ اندازه‌ی هندسی میکسرهای ساخته شده

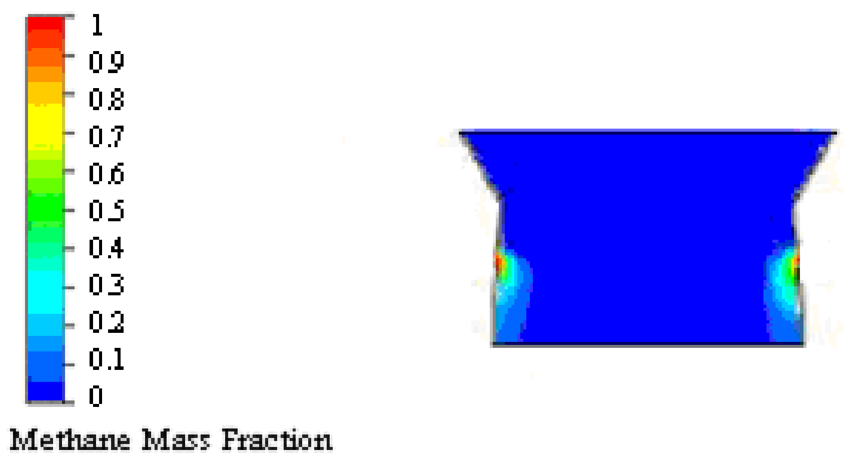
حالت	تغییر هندسه	L (mm)	D_2 (mm)	d (mm)	n
۱	افزایش قطر سوراخ ورودی گاز	۱۵/۲	۳۱	٤/٦	۱۰
۲	افزایش تعداد سوراخ‌های ورودی گاز با کاهش قطر ورودی گاز	۱۵/۲	۳۱	۱/۲	۳۰
۳	افزایش تعداد سوراخ‌های ورودی گاز با کاهش قطر ورودی گاز	۱۵/۲	۳۱	۱/۷	۳۰
٤	کاهش قطر گلویی	۱۵/۲	۲۵	۲/۵	۱۲

کانتورهای نسبت اختلاط

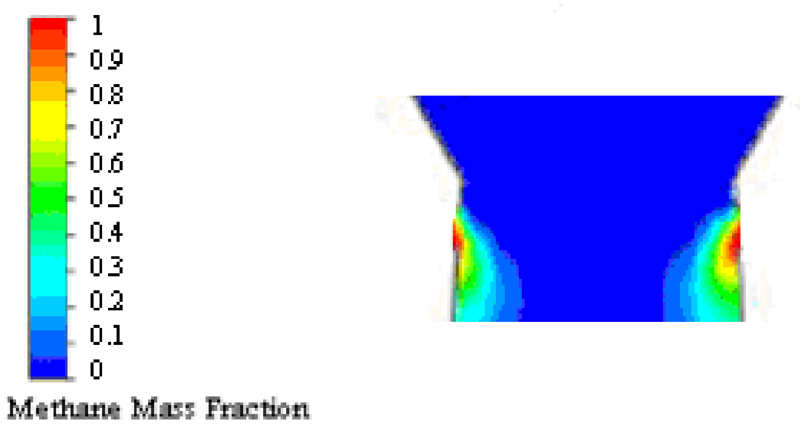
یک میکسر بایستی علاوه بر فراهم نمودن نسبت هوا به سوخت استوکیومتری برای موتور، توانایی ایجاد مخلوطی همگن از هوا و متان را نیز داشته باشد. مخلوط همگن باعث کارکرد روان موتور خواهد شد.

زمانی‌که λ در محدوده‌ی مجاز بوده، ولی اختلاط هوا و سوخت غیرهمگن باشد، مخلوط ورودی به موتور، علی‌رغم نسبت هوا به سوخت مناسب، مفید نخواهد بود و لذا بایستی از همگنی مخلوط هوا و سوخت یش از ورود به موتور مطمئن بود.

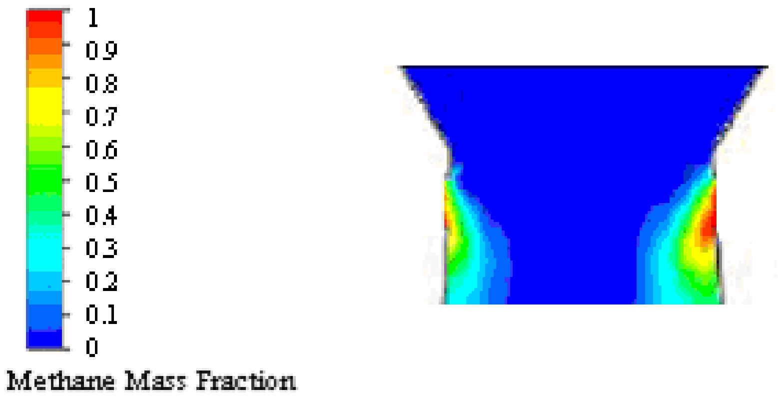
برای ایجاد مخلوطی همگن بایستی که مقدار و سرعت گاز ورودی به میکسر مناسب باشد. این دو عامل، مستقیماً به تعداد و قطر سوراخ‌های ورودی گاز بستگی دارد. در ادامه، کانتورهای نسبت حجمی سوخت متان به کل مخلوط در میکسرهای بهینه به لحاظ تئوری در دور3000rpm آورده شده است (شکل‌های ٦ تا ١٠).



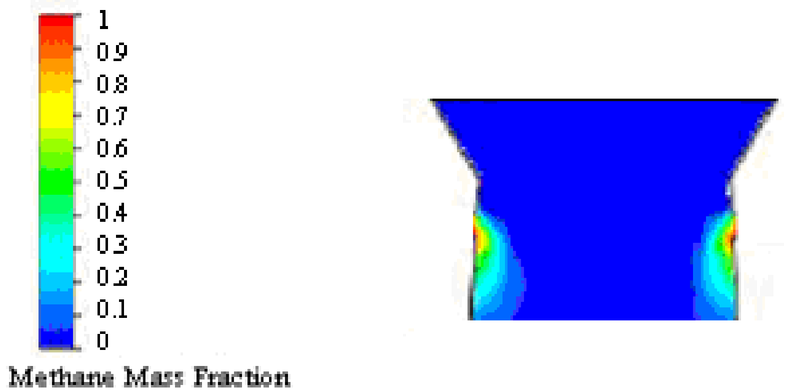
شکل٦ کانتور نسبت گاز متان به کل مخلوط در میکسر اولیه در دور 3000rpm



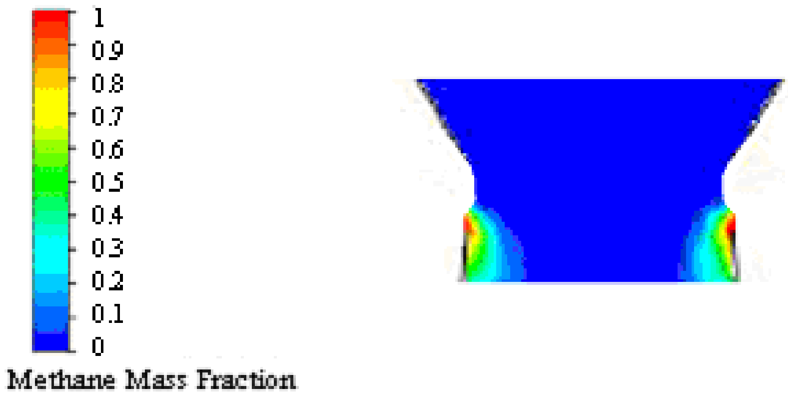
شکل ۷ کانتور نسبت گاز متان به کل مخلوط در میکسر حالت اول در دور 3000rpm



شکل ۸ کانتور نسبت گاز متان به کل مخلوط در میکسر حالت دوم در دور 3000rpm



شکل ۹ کانتور نسبت گاز متان به کل مخلوط در میکسر حالت سوم در دور 3000rpm



شکل ۱۰ کانتور نسبت گاز متان به کل مخلوط در میکسر حالت چهارم در دور 3000rpm

از شکل‌های فوق، نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- در حالت اول به‌دلیل افزایش اندازه‌ی d و ورود سوخت بیشتر، میزان نفوذ متان بیشتر شده و همگنی مخلوط را افزایش می‌دهد.

۲- در حالت دوم، به‌دلیل ریزتر شدن سوراخ‌های ورودی گاز و در پی آن افزایش سرعت ورودی، همگنی مخلوط در بهترین حالت قرار می‌گیرد. ولی همان‌گونه که در قسمت تست ذکر خواهد شد، این میکسر به‌دلیل ریزبودن d و نداشتن شتاب اولیه، مورد کاربرد نخواهد بود.

۳- در حالت سوم با افزایش اندازه‌ی d همگنی اختلاط نسبت به حالت قبل کاهش یافته، ولی نسبت به میکسر اولیه بهتر می‌باشد.

٤- در حالت چهارم با کاهش قطر ونتوری و مکش بیشتر گاز، تعداد سوراخ‌های ورودی گاز کاهش می‌یابد. در این حالت نیز میزان نفوذ گاز نسبت به میکسر اولیه بهتر شده‌است.

در ادامه، میکسرهای فوق، مورد تست‌های قدرت و آلودگی و نیز عملکرد حرکت در جاده قرارگرفته‌اند.

تست میکسرهای ساخته‌شده

میکسر اولیه به همراه میکسرهای ساخته‌شده جهت تأیید نتایج تئوری حاصل از شبیه‌سازی، تحت آزمایش‌های زیر قرار گرفته‌اند:

۱- تعیین قدرت موتور و گشتاور وارد شده بر چرخ‌های محرک توسط شاسی دینامومتر (Dynamometer)،

۲- سنجش میزان گازهای خروجی از اگزوز توسط دستگاه تحلیل‌گر آلودگی خودرو (Automotive Emission Analyzer)،

۳- کیفیت روشن شدن موتور در حالت کارکرد درجا و دور موتور در آن حالت،

٤- شتاب اولیه‌ی خودرو،

٥- شتاب متوسط با محاسبه‌ی زمان رسیدن سرعت از صفر تا 100km/hr در جاده،

٦- توقف سریع و ناگهانی خودروی در حالت سرعت (به منظور روشن ماندن موتور).

آزمایشگاه

محل انجام آزمایشات، آزمایشگاه شاسی دینامومتر شرکت الکتروفن واقع در شهرستان قم می‌باشد. این شرکت از پیمانکاران اصلی تبدیل ناوگان سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور بوده و دارای آزمایشگاه‌ها و تجهیزات مجهز و مرجع در این زمینه می‌باشد. این آزمایشگاه شامل امکانات شاسی دینامومتر به همراه کامپیوتر متصل به آن برای ثبت داده‌های آزمایش در محیط نرم‌افزار موتوراسکن و دستگاه سنجش آلاینده‌های خروجی از اگزوز خودرو می‌باشد.

نرم‌افزار موتوراسکن، برای ثبت قدرت اندازه‌گیری شده‌ی موتور خودرو در سرعت‌های معین به‌کار می‌رود. محیط این نرم‌افزار، ساده بوده و قدرت موتور را تا دقت 1kW در محدوده سرعت‌های 70km/hr تا 120km/hr به‌ازای هر 10km/hr ثبت می‌نماید. اعداد ثبت شده، قابلیت ذخیره و چاپ را دارا می‌باشند.

به منظور سنجش درصد آلاینده‌های خروجی اگزوز، از دستگاه تحلیل‌گر آلودگی خودرو استفاده شده‌است. این دستگاه، توسط یک پروب(Probe) که درون اگزوز خودرو قرار داده می‌شود؛ آلاینده در حالت کارکرد درجای موتور، میزان و درصد گازهای خروجی نظیر CO، HC، CO_2 و O_2 را به ترتیب برحسب درصد جرمی (دقت ۰/۰۱ واحد)، ppm (با دقت ۱ واحد)، درصد جرمی (دقت ۰/۰۱ واحد) و درصد جرمی (دقت ۰/۰۱ واحد) ثبت می‌کند.

جهت دستیابی به اهداف نظارتی آلاینده‌های خودروهای سواری و وسایل نقلیه‌ی سبک، مقادیر آلاینده‌های خروجی در حین شبیه‌سازی چرخه‌ی رانندگی شهری متعارف (مانند استارت سرد و الگوهای رانندگی غیریکنواخت) هنگام آزمایش روی شاسی دینامومتر خودرو (کارکرد درجا)، اندازه‌گیری می‌شوند.

اما از آن‌جایی‌که هدف این تحقیق، مقایسه‌ی کمی و کیفی آلاینده‌ها در حالات طراحی‌های اولیه (موجود) و بهینه بوده‌است؛ لذا در حالت کارکرد درجا، به اندازه‌گیری قدرت و گازهای آلاینده‌ی خروجی از اگزوز، پرداخته شده‌است.

نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

برای انجام هر آزمایش، ابتدا میکسر اولیه بر روی کیت

تبدیل نصب شده و سپس خودرو برای کارکرد مناسب در حالت درجا تنظیم شده‌است. داده‌های حاصل از آزمایش میکسر اولیه به‌عنوان مبنای مقایسه طراحی‌های بعدی می‌باشد.

به منظور آزمایش تعیین قدرت موتور و گشتاور وارد شده بر چرخ‌های محرک از شاسی دینامومتر استفاده شده است. این دستگاه شامل چهار عدد استوانه‌ای چرخنده با سطح زبر می‌باشد که چرخ‌های محرک خودرو بر روی آن قرار می‌گیرند. سپس برای انجام آزمایش، بایستی سرعت خودرو در حالت دنده سبک (دنده٤) به 70km/hr برسد. از این سرعت به بعد داده برداری از آزمایش توسط نرم‌افزار موتور اسکن (Motor Scan) روی نمایشگر کامپیوتر متصل به شاسی آغاز می‌شود.

منظور از کیفیت روشن شدن موتور در حالت ساکن این است که هنگام استفاده از سوخت گاز، موتور همانند حالت استفاده از سوخت بنزین توانایی روشن شدن را داشته باشد که این علامتی از سوخت‌رسانی مناسب گاز و نیز نسبت کافی هوا به سوخت در حالت بی‌بار می‌باشد. در هنگام شتاب اولیه‌ی خودرو، باید ضمن حفظ کارکرد پیوسته و مناسب موتور، مشکلی به لحاظ کیفیت حرکت اولیه‌ی سریع به‌وجود نیاید.

برای تست در جاده و بررسی عملکرد کیفی موتور در هر حالت، زمان رسیدن سرعت خودرو از حالت سکون تا رسیدن به سرعت 100km/hr توسط کرونومتر(ChroNOmeter) اندازه‌گیری شده‌است.

آزمایش‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده‌ی صحت تحلیل تئوری، و موارد ۳ تا ٦ مربوط به تست‌های کیفی و آنچه که در راندن خودرو مدنظر است، می‌باشند.

بحث و بررسی داده‌های حاصل از تست میکسرها

تست خودرو بر روی شاسی دینامومتر. در ابتدا خودرو بدون میکسر مورد تست واقع شده است. این حالت به منظور سنجش قدرت موتور در حالت استفاده از سوخت بنزین (حالت مبنا) انجام شده است؛ سپس میکسرهای مختلف، مورد تست قدرت موتور قرار گرفته شده‌اند. (جدول٤)

جدول٤ مقادیر قدرت موتور (kw) در حالت‌های مختلف به همراه درصد افت قدرت حالت گازسوز نسبت به بنزینی در کارکرد درجا

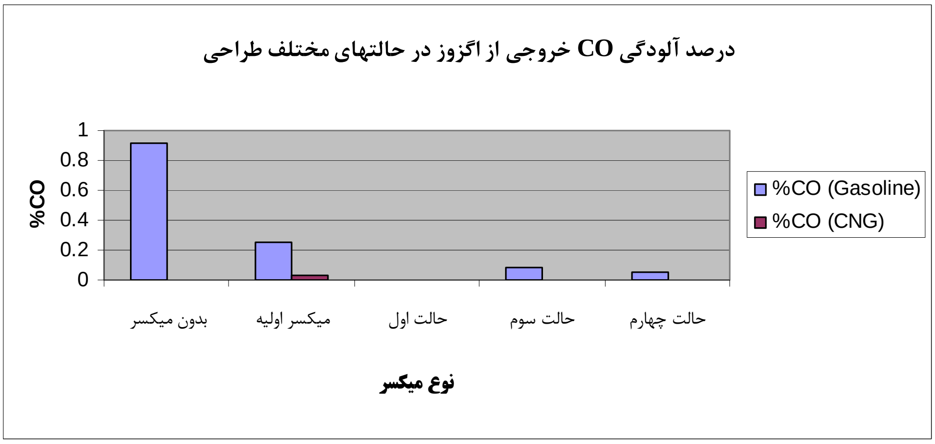
وضعیت	بدون میکسر	میکسر اولیه			حالت ۱			حالت ۳			حالت ٤		
سرعت (km/h)	بنزین (kw)	بنزین (kw)	گاز (kw)	٪ افت قدرت	بنزین (kw)	گاز (kw)	٪ افت قدرت	بنزین (kw)	گاز (kw)	٪ افت قدرت	بنزین (kw)	گاز (kw)	٪ افت قدرت
۷۰	۲۱	۲۰	۱۶	۲۰/۰۰	۲۱	۱۸	۱۴/۲۹	۲۱	۱۷	۱۹/۰۵	۲۱	۱۸	۱۴/۲۹
۸۰	۲۵	۲۳	۱۹	۱۷/۳۹	۲۳	۲۱	۸/۷۰	۲۴	۲۰	۱۶/۶۷	۲۴	۲۰	۱۶/۶۷
۹۰	۲۸	۲۷	۲۱	۲۲/۲۲	۲۵	۲۲	۱۲/۰۰	۲۶	۲۲	۱۵/۳۸	۲۶	۲۳	۱۱/۵۴
۱۰۰	۳۰	۲۷	۲۲	۱۸/۵۲	۲۸	۲۴	۱۴/۲۹	۲۷	۲۵	۷/۴۱	۲۸	۲۳	۱۷/۸۶
۱۱۰	۳۰	۲۹	۲۷	۶/۹۰	۳۰	۲۶	۱۳/۳۳	۲۸	۲۵	۱۰/۷۱	۲۹	۲۵	۱۳/۷۹
۱۲۰	۳۰	۳۰	۲۴	۲۰/۰۰	۳۰	۲۷	۱۰/۰۰	۲۹	۲۵	۱۳/۷۹	۳۰	۲۵	۱۶/۶۷
میانگین افت قدرت				۱۷/۵			۱۲/۱			۱۳/۸۴			۱۵/۱۳

داده‌های حاصل از تست خودرو توسط دستگاه تحلیل‌گر آلودگی خودرو

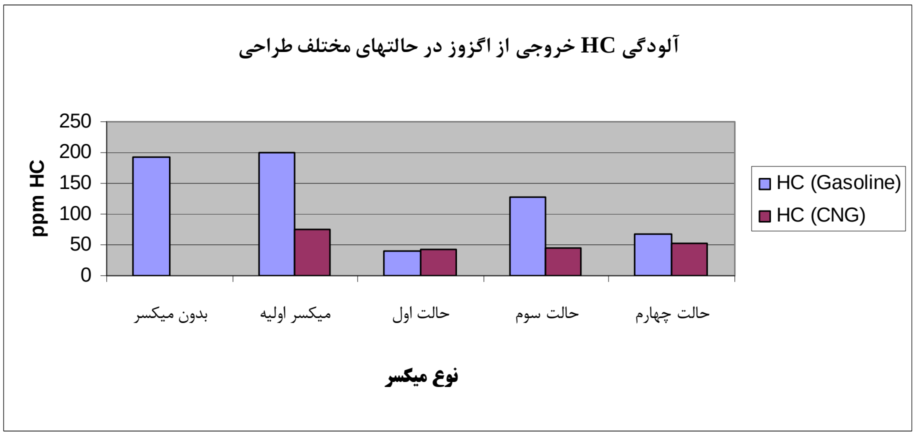
مقادیر گازهای خروجی از اگـزوز خـودرو در حالـت کارکرد درجا و با توجه به نوع سوخت مصرفی موتور به شرح جدول (۵) و شکل‌های (۱۱ تا ۱۳) می‌باشد.

جدول ۵ مقادیر گازهای خروجی از اگزوز در کارکرد درجا

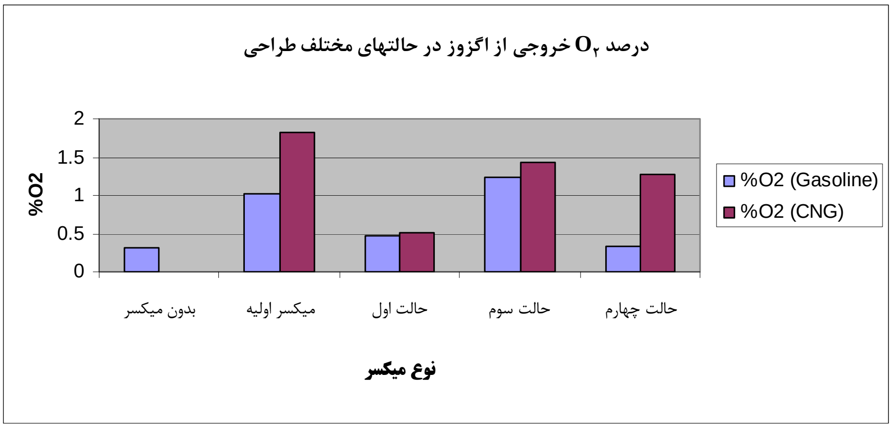
وضعیت	%CO		HC (ppm)		$\%CO_2$		$\%O_2$	
	بنزین	گاز	بنزین	گاز	بنزین	گاز	بنزین	گاز
بدون میکسر	۰/۹۲	--------	۱۹۲	--------	۱۵/۷۰	--------	۰/۳۱	--------
میکسر اولیه	۰/۲۵	۰/۰۳	۱۹۹	۷۶	۱۵/۴۰	۱۱/۵۰	۱/۰۲	۱/۸۳
حالت اول	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۰	۴۲	۱۵/۷۰	۱۲/۲۰	۰/۴۷	۰/۵۱
حالت سوم	۰/۰۸	۰/۰۰	۱۲۷	۴۵	۱۵/۳۰	۱۵	۱/۲۴	۱/۴۳
حالت چهارم	۰/۰۵	۰/۰۰	۶۷	۵۲	۱۶	۱۲	۰/۳۴	۱/۲۷



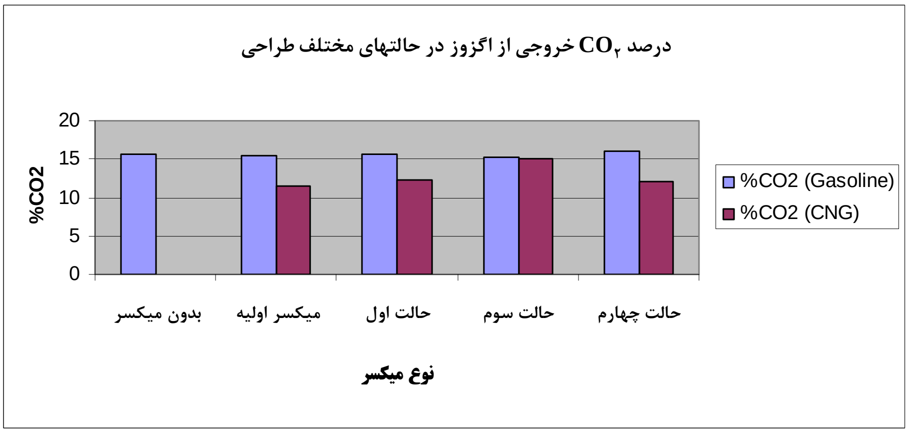
شکل ۱۱ نمودار درصد آلاینده CO خروجی از اگزوز بر حسب نوع میکسر در کارکرد درجا



شکل ۱۲ نمودار ppm آلاینده HC خروجی از اگزوز بر حسب نوع میکسر در کارکرد درجا



شکل ۱۳ نمودار درصد گاز O_2 خروجی از اگزوز بر حسب نوع میکسر در کارکرد درجا



شکل ۱٤ نمودار درصد گاز CO_2 خروجی از اگزوز بر حسب نوع میکسر در کارکرد درجا

جدول ٦ نتایج حاصل از تست میکسرها در جاده

وضعیت	دور موتور در حالت ساکن (rpm)	تغییرات شتاب متوسط (نسبت به میکسر اولیه)	شتاب متوسط ($\bar{a}$) ۰ تا ۱۰۰ (m/s^2)	زمان رسیدن به سرعت 100 km/hr یا سرعت بیشینه (s)	بیشینه سرعت در پیمایش طول مشخص (km/hr)	شتاب اولیه (ارزیابی کیفی)
میکسر اولیه	۱۰۰۰	۰	۰/٦٦	٤۲/۱۲	۱۰۰	خوب
حالت ۱	۹۵۰	-٪۲٥/٧٦	۰/٤۹	٥٦/۲۳	۱۰۰	خوب
حالت ۲	۸٥۰	----	----	----	----	ضعیف
حالت ۳	۱۰۰۰	٪۱۹/۷۰	۰/۷۹	۳٥	۱۲۰	عالی
حالت ٤	٥۰۰	-٪٤/٥٤	۰/٦۳	٤۰	۹۰	بسیار خوب

داده‌های حاصل از تست جاده و قابلیت حرکت خودرو . پس از انجام مراحل مختلف تست در آزمایشگاه، تست جاده و بررسی آنچه که واقعا در عمل اتفاق می‌افتد، صورت می‌پذیرد. جدول (٦) نتایج حاصل از تست جاده میکسرهای مورد بحث را نمایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بررسی نتایج تست اندازه‌گیری قدرت موتور. نتایج حاصل از تست قدرت موتور بر روی شاسی دینامومتر در جدول (٤) آورده شده‌اند.

همان‌گونه که نتایج آزمایش خودرو برر وی شاسی دینامومتر نشان می‌دهند، میانگین افت قدرت در حالت کنونی (استفاده از میکسر اولیه) مقداری برابر ۱۷/۵٪ دارد و در عین حالی که رقم بالایی است، اما عددی معمول در میزان افت قدرت در میکسرهای مورد کاربرد است. میانگین افت قدرت در حالت‌های جدید طراحی، همگی کم‌تر از مقدار اولیه بوده و به لحاظ عددی، حالت اول، کم‌ترین افت قدرت را نسبت به بنزین دارد.

در حالت بار کامل(Full Load) (سرعت 120km/hr)، میزان افت قدرت میکسر۱ به کم‌ترین مقدار، بین میکسرهای مختلف رسیده‌است (ده درصد). این مقدار برابر مقدار افت استانداردی است که سوخت گاز نسبت به بنزین به لحاظ تئوری دارد. (ر.ک. بخش۲–۱ رابطه‌ی ۱–۲)

نتیجه‌ی مهم دیگری که از جدول (٤) به‌دست می‌آید، این است که میزان قدرت موتور در حالت‌هایی که سوخت بنزین به‌کار رفته است با یکدیگر تفاوت چندانی نمی‌کنند و نشان دهنده‌ی این موضوع است که این نوع میکسر در حالت استفاده از سوخت بنزین، افت قدرت قابل قبولی را نسبت به موتور تک سوخته بنزینی خواهد داشت.

موارد مهم دیگری نیز در انتخاب میکسر مناسب، مؤثر هستند که از آن جمله می‌توان به میزان نشر آلاینده‌ها و نیز کارکرد مناسب خودرو در حال حرکت اشاره کرد.

بررسی نتایج تست اندازه‌گیری گازهای خروجی. از بررسی جدول ٥ و نمودارهای ۱۱ تا ١٤، این‌گونه نتیجه گرفته می‌شود که کم‌ترین میزان آلاینده‌های خروجی (CO و HC) مربوط به حالتی است که میکسر۱ به کار برده شده است. در رابطه با میزان CO_2 بایستی به این مطلب اشاره کرد که هرچه میزان این گاز در خروجی بیشتر باشد، به منزله احتراقی کامل‌تر و عملکرد نزدیکتر به حالت استوکیومتری است و در مقابل میزان آلاینده CO در خروجی نشان‌دهنده‌ی احتراق ناقص است. در حالت ۱ آلاینده CO به نزدیک صفر رسیده‌است.

در بین حالت‌های مختلف طراحی حالت اول میزانCO_2 آن در حالت گازسوز بیشتر از بقیه‌ی حالت‌ها بوده و نشان‌دهنده‌ی نزدیک بودن طراحی به شرایط استوکیومتری است.

در تمام حالت‌های طراحی بهینه، میزان CO در حالت گازسوز به صفر رسیده که حاکی از احتراق کامل‌تر نسبت به میکسر اولیه می‌باشد. در حالت بنزین‌سوز نیز میزان CO به حداقل رسیده‌است؛ بنابراین در بین تمام حالت‌های تست شده، بهترین بهسوزی سوخت، مربوط به حالت میکسر۱ می‌باشد.

بررسی نتایج تست جاده. ابتدا میکسر مورد کاربرد در کیت تبدیل (میکسر اولیه) مورد تست قرار گرفت تا نتایج حاصل از آن، به‌عنوان مبنای مقایسه با دیگر حالات درنظر گرفته شود.

در حالت اول، همان‌طور که انتظار می‌رود، به‌دلیل افزایش قطر سوراخ‌های ورودی گاز و کاهش تعداد آن‌ها، میزان همگنی مخلوط سوخت و هوا کم‌تر شود و بالطبع این عامل، تأثیری بر عملکرد موتور گذاشته و باعث می‌شود شتاب متوسط کاهش یابد. این حالت به کاهش ۲۵/۷٦٪ در شتاب متوسط نسبت به میکسر اولیه رسیده‌است که نشان‌دهنده‌ی غیرهمگن بودن مخلوط هوا و گاز می‌باشد.

میکسر دوم، به‌دلیل ریزبودن سوراخ‌های ورودی گاز، در شتاب اولیه که پدال گاز به‌صورت ناگهانی

فشرده می‌شود، سوخت ورودی نسبت به هوای ورودی کم‌تر وارد شده و موتور به اصطلاح خفه می‌کند و خاموش می‌شود؛ بنابراین اگرچه ریز بودن سوراخ‌های ورودی گاز و تعداد آن‌ها نسبت مستقیم با همگنی مخلوط سوخت و هوا دارد ولی ذکر این نکته لازم است که اندازه‌ی آن نبایستی از یک حدی کم‌تر باشد؛ که با آزمایش و درنظر گرفتن ملاحظات ساخت حداقل اندازه‌ی آن ۱/۵ میلی‌متر تعیین می‌گردد؛ اگرچه کارکرد موتور با افزایش دور بسیار عالی و روان است. این حالت به‌دلیل نداشتن شتاب اولیه، مورد تست قرار نگرفته‌است.

مزیت میکسر سوم نسبت به دوم، بزرگتر بودن اندازه‌ی قطر سوراخ‌های ورودی گاز می‌باشد که باعث برطرف شدن عیب کارکردی حالت قبل شده و شتاب اولیه‌ی آن را بهبود می‌بخشد. در این حالت، بیشینه سرعت به 120km/hr در طول پیموده شده‌ی یکسان رسیده و به لحاظ عملکردی و قدرت و شتاب اولیه، نزدیکترین حالت به بنزین است. این حالت به افزایش ۱۹/۷۰٪ در شتاب متوسط نسبت به میکسر اولیه رسیده‌است که مقدار قابل ملاحظه‌ای است؛ البته در این حالت، همان‌گونه که از نتایج تست اندازه‌گیری قدرت موتور بر می‌آید، در سرعت 100km/hr میزان افت قدرت به ۷/٤۱٪ رسیده‌است که مقدار بسیار مطلوبی است. در این سرعت، میزان قدرت موتور نزدیک به حالت بنزینی است و باعث شده‌است که در میزان شتاب نیز تأثیر خود را نشان دهد؛ البته دلیل اصلی افزایش شتاب خودرو، هندسه‌ی مناسب‌تر میکسر جهت اختلاط همگن گاز و هوا می‌باشد.

در حالت چهارم؛ حتی زمان توقف اتومبیل، دور موتور پایین‌تر از حالت بنزینی است و این نشان دهنده‌ی نسبت مناسب‌تر هوا به سوخت ورودی می‌باشد که باعث روشن ماندن موتور در آن دور پایین می‌شود. البته عیب این نوع میکسر کم‌تر بودن ماکزیمم سرعت آن نسبت به میکسرهای دیگر است. در این نوع میکسر، کارکرد موتور بسیار خوب و مشابه حالت کارکرد سوخت بنزین است که مبین مقدار نسبت هوا به سوخت نسبی در حالت تئوری است؛ اما در دورهای بالا و دنده سبک، به‌دلیل کم‌تر بودن قطر ونتوری و در نتیجه‌ی آن، کاهش هوای ورودی و سوخت، قدرت موتور کم‌تر شده و بیشینه سرعت از حالت‌های دیگر کم‌تر می‌باشد (شتاب متوسط کم‌تر). در دنده سبک، شتاب کم‌تر شده و زمان افزایش سرعت (بعنوان مثال از ۹۰ به ۹۵) زیاد می‌شود؛ بنابراین این طراحی برای کارکرد طبیعی موتور جایی که سرعت درحد معمولی و عملکرد پیوسته و آرام موتور مخصوصاً روشن شدن درجا مشابه حالت بنزینی مدنظر باشد؛ مناسب است. (به عنوان مثال برای اتومبیل‌های عمومی و استفاده درون شهری). مزیت عمده این طراحی علاوه بر تنظیم بهتر سوخت و هوا، کم مصرف بودن آن است.

همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد، طراحی‌های بهینه به چند مورد منتهی می‌شوند که بسته به نوع کاربرد، قابل استفاده هستند؛ البته با توجه به آزمایشات فوق، میکسر۱ به لحاظ شاخص‌های قدرت و آلودگی در وضعیت بهتری نسبت به حالت‌های دیگر قرار دارد.

مراجع

1. Dulger Z. "Numerical Modeling of Heat Release and Flame Propagation for Methane Fueled Internal Combustion Engines with Hydrogen Addition", PhD thesis, University Of Miami (1991)

2. Yusaf T., Zamri M., "Development of a 3D CFD Model to Investigzte the Effect of the Mixing Quality on the CNG-Diesel Engine Performance", *COE, UNITEN, 43009 Kajang*, Selangor, Malaysia (2000)

3. Talal F. Yusaf, Yuosoff Ali, Abdul Halim Shamsuddin, "CNG Mixer for a Commercial Diesel Engine", *7th Int. Conf. and Exhibition on Natural Gas Vehicles*, Yokohama, Japan, pp. 567-574, (2000)

٤. خرم‌فر، فرشید و قدیمی ماهانی، امیرهوشنگ و جهانبخش رفیعی، سعید، "راه‌کاری برای بهینه سازی افت توان خودروهای دوگانه‌سوز ناشی از استفاده میکسر در حالت بنزین‌سوز"، اولین همایش سوخت جایگزین (CNG) و خودروهای گازسوز، تهران، ص ۷۹– ۸۷، (۱۳۸۳).

5. Devarajan A/L RAMASAMY, "Development of a Compressed Natural Gas (CNG) Mixer for a Two Stroke Internal Combustion Engine", M.Sc Dissertation, Dept. Mech. Eng., University Teknologi Malaysia, (2005).